

Ing. Evžen Pichler, CSc. - VÚHU, a.s. Most

Hydrofyzikální testování jemnozrnných zemin a granulátů

Hydrofyzikální vlastnosti propustných i málo propustných zemin a technologicky upravených materiálů se v a.s. VÚHU Most zjišťují polními i laboratorními zkouškami. Nejvíce jsou frekvencovány zkoušky prováděné na propustoměru **GEONOR A/S** a na v současné době instalovaných jednotkách **WD 1000/3** a **WD 250 STRASSENTTEST**.

Tyto zkoušky provádí státem akreditovaná zkušební laboratoř testování hornin, registrovaná **CIA Praha** pod č. **067/1994** podle interních metodických předpisů s přihlédnutím k německé normě **DIN 18130**. Příspěvek pojednává především o obecných i specifických podmínkách laboratorního testování a upozorňuje na alternativní možnosti prováděných zkoušek s konstantním a proměnlivým hydraulickým spádem za různých tlakových režimů až po **1,2 MPa**.

Zvýšený zájem o testování jemnozrnných zemin a technologicky upravených produktů spalování - granulátů, zajisté souvisí s vyšší potřebou zhodnocování a využívání

- těžených nadložních zemin jako přírodního zdroje jílového minerálního těsnění pro nejrůznější stavební a revitalizační záměry
- technologicky upravených produktů spalování hnědého uhlí z klasických a fluidních typů energetických a teplárenských topenišť jako stavebního materiálu pro širokou škálu použití v povrchových dolech.

Při využívání uvedených materiálů pro revitalizaci krajiny (odstranění starých ekologických zátěží) a pro stavbu výsypkových těles se stanovují podmínky, které respektují zákon č. 17 ze dne 5. 12. 1991 o životním prostředí, zejména jeho hlavní složky, kterými jsou ovzduší, voda, půda, organismy, ekosystémy a energie. Při zřizování technických bariér pro umístění skládek odpadů se postupuje podle **ČSN 83 8030 - "Skládkování odpadů, základní podmínky pro navrhování a výstavbu"**. Tato norma je podle zákona č. 142/1991 Sb., o československých technických normách ve znění zákona č. 632/1992 Sb., závazná na základě požadavku **MZP ČR**. Stanovuje podmínky, kdy postačuje jednoduché těsnění, je-li podloží tvořeno jednoduchou geologickou bariérou a kdy je nutné těsnění, složené z více těsnících prvků příslušných funkčních vlastností, za nepropustné překrytí skládek odpadů zeminami se považují tatkové, které po zhutnění vykazují součinitel filtrace $k \leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$.

Přes velmi rozsáhlou škálu odlišných fyzikálních, chemických a technologických vlastností mezi jílovitou sypaninou a granuláty, je pro ně charakteristická vysoká pórovitost. Ta se obvykle vyjadřuje číslem pórovitosti e s vazbou na stupeň ulehlosti, vyjádřený pomocí indexu relativní hutnosti I_p .

Relativní hutnost zahrnuje stavy nejkypřejšího a nejtěsnějšího uložení zkoušeného materiálu, stanovené předepsaným laboratorním postupem.

Vysoká pórovitost uvedených materiálů se projevuje citlivostí zemních a popelových těles k účinkům průsakového tlaku vody a k účinkům pórového tlaku. Jsou tedy náchylné k erozním vlivům povrchové i podzemní vody a v případě nízké ulehlosti i ke ztekucení.

Podle již v minulosti provedených výzkumů v oblasti spolehlivého určení hydrofyzikálních vlastností a hydrotechnických parametrů přírodních zdrojů i antropogenních akumulací, je vhodné při modelování proudové sítě uspořádat dva modely

- propustně anizotropní model, kdy poměr filtračních součinitelů k_h v subhorizontálním směru ku k_v ve vertikálním směru je alespoň 10
- propustně heterogenní model, kdy se simulují horizontálně uložené vrstvy s rozdílnými filtračními součiniteli odlišujícími se o 1 až 2 řády.

Výzkumný ústav pro hnědé uhlí, a.s. Most provádí hydrofyzikální testování v potřebném rozsahu těmito způsoby :

1. Krátkodobými nebo dlouhodobými čerpacími nebo vsakovacími zkouškami v hydrogeologických vrtech. Zde se provádí především kvantitativní testování průlinových kolektorů, průlinových puklinových kolektorů a puklinových kolektorů pro navrhování vodohospodářských opatření.
2. Polními zkouškami na povrchu antropogenních akumulací a zbytkových jam metodou soustředěných válců /1/. Touto metodou se kromě hydraulické vodivosti zjišťuje infiltrační schopnost a další hydrotechnické parametry, jako např. efektivní drenážní pórovitost pro vytypování ploch vhodných k zástavbě nebo pro výběr vhodných rekultivačních postupů /2, 3/.
3. Laboratorními zkouškami pro hodnocení průsaků zemním tělesem, které nepřímo ovlivňují rychlost deformace zemin a rychlost, jakou se realizuje změna přenosu napětí. Pro navrhování jednoduchého kombinovaného nepropustného těsnění podloží a překrytí skládek odpadů a kontrolu kvality zhutňovaných ploch, se používá propustoměrů pro měření velmi málo propustných zemin. Z hydraulického hlediska jde především o zkoumání izolátorů v oblasti nepropustných zemin s $k < 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ nebo velmi málo propustných s $k < 10^{-5} \div 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$. Jíly vysoké plasticity, které vykazují $k < 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ a jsou vhodné pro použití jako jílově minerální těsnění, se považují za prakticky vodotěsné.

Měření vodopropustnosti málo propustných až nepropustných materiálů, vyjádřené součinitelem k , představuje obecně průtokové množství kapaliny o absolutní viskozitě, proteklé za časovou jednotku jednotkovým průřezem při hydraulickém spádu. Dosažením stoprocentního stupně nasycení zkoušeného vzorku určíme součinitel hydraulické nasycené vodivosti. Matematicko-fyzikálně lze celý proces popsat rovnicí

$$Q = A \cdot k \cdot \frac{H}{l} \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta}}$$

kde : A je průřezová plocha vzorku / m^2 /

k - součinitel propustnosti a při $S_r = 100 \%$ součinitel hydraulické nasycené vodivosti

H - tlaková výška

l - filtrační délka

$\sqrt{\eta}$ - viskozita kapaliny

V případě zavedení jednotkového hydraulického spádu

$$i = \frac{\Delta H}{l} = 1$$

a po provedeném měření při teplotě $T = 10^\circ \text{C}$, kdy $\sqrt{\eta} = 1$ můžeme rovnici přepsat na tvar

$$k = \frac{V}{t \cdot A}$$

Součinitel filtrace k při zkoušce s konstantním spádem se určí ze vzorce

$$k = \frac{V}{t} \cdot \frac{l}{A \cdot h}$$

kde : V je průtokové množství kapaliny / m^3 /

t - čas / s^{-1} /, při němž poklesne hladina kapaliny v byretě z hladiny h_0 na h_1 / m /

h - rozdíl hladin mezi vtokovou a výtokovou trubicí / m /.

Při zkoušce s proměnlivým hydraulickým spádem

$$k = \frac{a \cdot l_0}{A \cdot t} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2},$$

kde : a - průřezová plocha plastové trubičky /m/

l_0 - výška zkoušeného vzorku /m/

h_1, h_2 - tlakové výšky na začátku a na konci měření /m/.

Podle teploty kapaliny, při které proběhne testování vzorku, se provede korekce součinitele filtrace (při $T = 10^\circ\text{C}$, $\alpha = 1,0$).

Pro stanovení hydrofyzikálních parametrů a především součinitele filtrace, jako jedné ze základních fyzikálně - technických zkoušek, se v a.s. VÚHU využívá originální přístroj norské výroby **GEONOR A/S** - typ **m - 45**. Přístroj byl původně navržen pro měření propustnosti hutněných jílu, ale ve zkušebních laboratořích testování hornin a.s. VÚHU se používá i pro měření propustnosti neporušených vzorků, u kterých jsou zachovány vlastnosti v původním uložení. Jde o prováděné odběry vzorků z vrtů různými odběrnými přístroji na principu dvojité jádrovky.

Propustoměr **GEONOR** umožňuje řídit stupeň nasycení zeminy kapalinou (rozpuštět vzduch v pórech zeminy) s velkou citlivostí a měřit průtokové množství kapaliny v širokém rozsahu

$$k = 1.10^{-9} \div 1.10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$$

při různých komorových tlacích a hydraulických gradientech. Testování vzorků je možné provádět s volbou několika syticích tlaků tak, až se dosáhne asymptotické hodnoty odpovídající 100 % stupni nasycení. Vždy musí platit mezi komorovým $\sigma_3 = \sigma_2$, proudovým syticím σ_u a konsolidačním napětím σ_c , že $\sigma_3 = \sigma_2 > \sigma_u > \sigma_c$.

Při určování vhodnosti těsnění podkladu a překrytu skládek odpadů podle /4/ se považují za směrné k , získané ze zkoušek prováděných s hydraulickým spádem $i = 30$.

Vhodnost zkoumaných monotypů zemin pro těsnící účely se posuzuje podle další škály analýz fyzikálních a mechanických vlastností a zhutnitelnosti podle zkoušky **Proctor standard**. Na základě provedených zkoušek je obvykle předepisována vlhkost hmotnostní w_{opt} , při níž je zemina hutněna na objemovou hmotnost maximální ρ_{dmaxPS} . Používaná hutňací energie $597,1 \text{ kJ.m}^{-3}$ je mírně zvýšena empirickým postupem v porovnání se standardní **Proctorovou zkouškou**, prováděnou podle ČSN 72 1015.

V propustoměru **GEONOR** se zkouší vzorky o průměru **50,35 mm** a průřezové ploše **2000 mm²**. Hutněné vzorky zeminy, a někdy i neporušený vzorek s přirozenou strukturou, nejsou plně nasyceny a proto je nutné je v propustoměru před započítím zkoušky sytit. Hodnoty potřebného sycení a syticího tlaku byly pro propustoměr **GEONOR** odvozeny podle výchozího stavu vzorku, počáteční hodnoty stupně nasycení S_r .

Zemina v propustoměru je sycena a konsolidována a tím dochází ke změnám vlhkosti w a objemové hmotnosti vysušené zeminy ρ_d .

Dosud provedenými zkouškami chování směsí zemin a granulátů se prokázala výhodnost použití granulátů při stavbě výsypkových těles. Přidáváním granulátů do výsypkové zeminy se totiž snižuje citlivost zeminy na vlhkost, což vyjadřuje plošší tvar získaných křivek **PS**, přičemž narůstá optimální vlhkost w_{opt} a klesá objemová hmotnost suché směsi ρ_d , jak ukazuje **obr. 1**. Při těchto zkouškách byla zjištěna závislost propustnosti granulátů na jejich obsahu jemné frakce podle

$$k = 0,01 d_{10}^{1,7} / \text{m.s}^{-1} /$$

kde : d_{10} - průměr zrn příslušející 10 % hmotnostnímu podílu propadu

Testování propustnosti zemin, granulátů a jejich směsí bylo prováděno na propustoměru **GEONOR** vybaveném jednou tlakovou komorou, což omezovalo rozsah prováděných zkoušek.

Od poloviny roku 1996 jsou již v a.s. VÚHU k dispozici další typy propustoměrů fy **STRASSENTTEST Baustoff - Prüfsysteme**, se šesti měřicími místy, pracující s přetlakovým systémem vyvozovaným pístovým kompresorem. Zkušební zařízení je v provedení antikoročním a lze jím nastavit nezávislé tlakové režimy na každém měřicím místě. Ke zkouškám je možné použít alternativně i agresivní vody, tedy i vzorky průmyslového odpadu. Součástí zařízení je jednotka sloužící k výrobě odvdoušené vody na principu podtlaku.

V a.s. VÚHU byly zprovozněny dvě jednotky propustoměrů - základní **WD 1000/3** s možností nastavení tlakových režimů do **1 MPa** a přídatná **WD 250/3** do **250 kPa**.

Na základní jednotce **WD 1000/3** lze provádět testování hydrofyzikálních parametrů pro nasycení vzorků a nastavení režimu hydraulického spádu. Zkoušky propustnosti je možné provádět za konstantního i proměnlivého hydraulického spádu se vzorky o průměru **100 mm**. Podle normy **DIN 18130 /5/** se volí hodnoty sytícího tlaku podle počáteční hodnoty stupně nasycení.

S_r (%)	u (kPa)
100	0
95	300
90	600
85	900

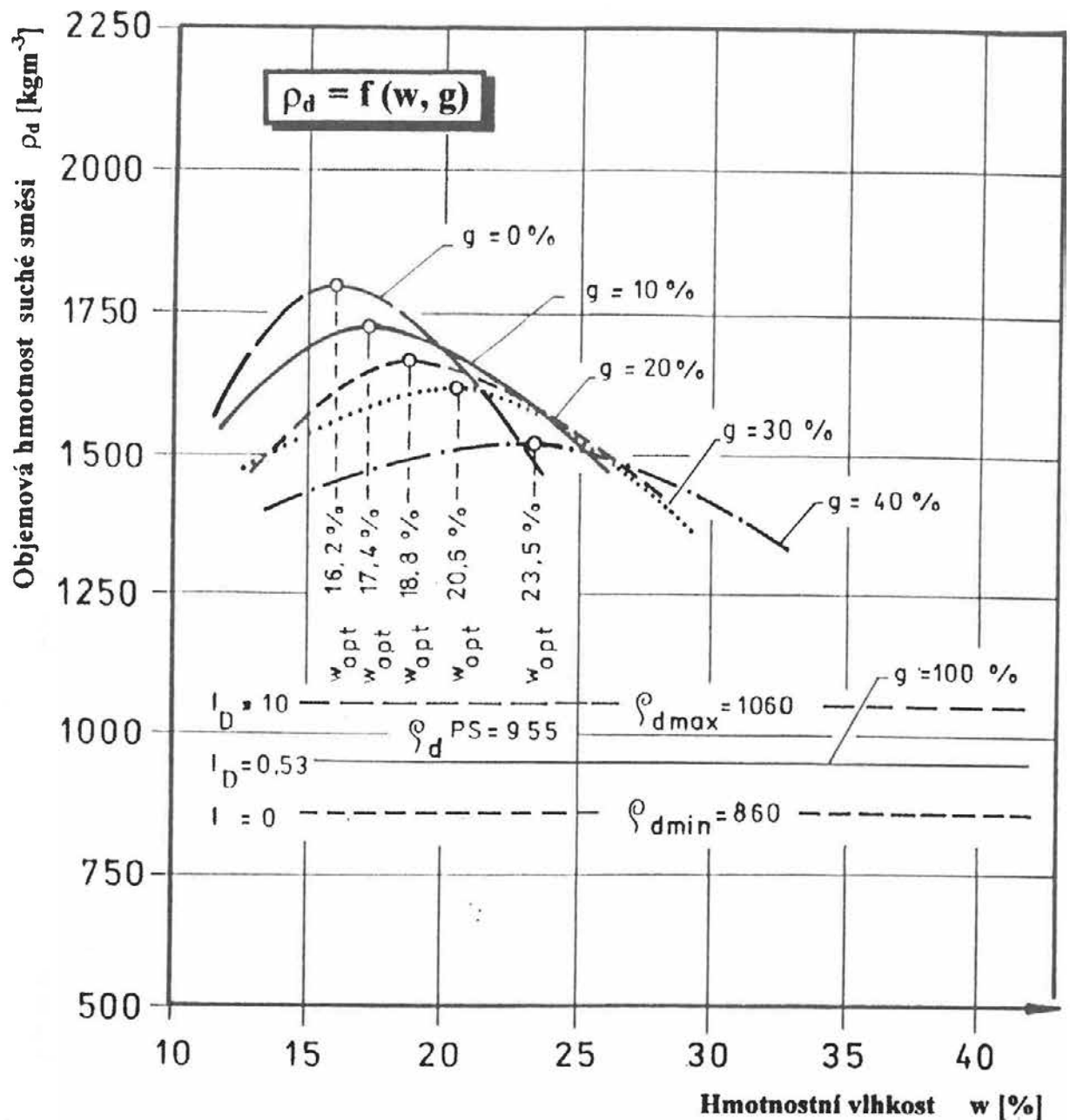
Na přídatné jednotce **WD 250/3** lze určovat součinitel propustnosti jak porušených, tak neporušených vzorků $\varnothing$ **50 mm** jen s konstantním hydraulickým spádem, který je stupňovitě volitelný do $i = 250$. Zařízení je opatřeno samostatnými děliči médií (kapalina procházející vzorkem je oddělena od měřicí části) na všech třech měřicích místech.

Jen rámcově uvedené možnosti zjišťování hydrofyzikálních parametrů na laboratorních propustoměrech ojedinělé konfigurace v ČR, jsou podmíněny rozsahem tlakových režimů. Maximální tlaky, za kterých může spolehlivě pracovat propustoměr **GEONOR** a **STRASSENTTEST** jednotka **WD 1000/3**, je **1,2 MPa** (max. odolnost systému je větší). To umožňuje řešit i působení hydrostatických tlaků ve zbytkových jámách na kolektory podzemní vody a potřebný rozsah zatěsnění.

Při testování zemin se uplatňuje princip ověřování maximální propustnosti, který vyplývá z ověřené závislosti součinitele filtrace na sytícím napětí. Vzorky jsou zkoušeny v podmínkách, kdy jsou plně nasyceny (kontrolní zkouška S_r po provedené zkoušce). Konsolidační napětí je konstantní. Je třeba ověřovat závislost součinitele filtrace na zhutnění a výchozí vlhkosti. Je-li zemina zhutňována při nižších vlhkostech, má z hlediska těsnění i stability struktury horší vlastnosti. Hutnění zeminy za vyšších vlhkostních stavů, nepřekračujících mez plasticity, podmiňuje její zpravidla vhodnější chování.

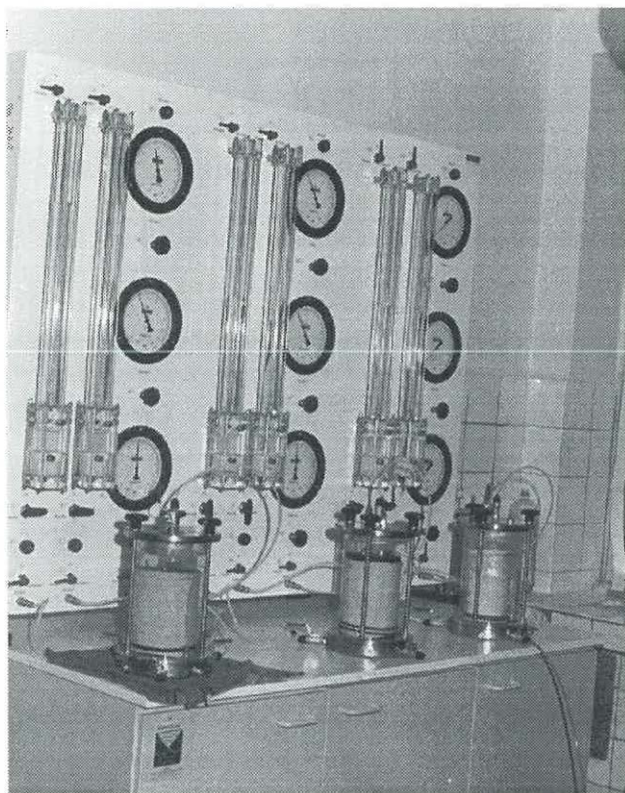
Literatura

1. Dvořák P. : Odvodňování podloží výsypek, typizační směrnice. SHP - Báňské projekty Teplice / 1988 /
2. Milič J. : Určení závislosti koeficientu filtrace, druhu provedených rekultivačních prací na časovém faktoru. Výzkumná zpráva 182/94, VÚHU, a.s.
3. Milič J. : Vztah mezi koeficientem filtrace a druhem provedených rekultivačních prací. Optimalizace plánovaných rekultivačních prací na výsypkách DNT. Výzkumná zpráva 179/93, VÚHU, a.s.
4. ČSN 83 8030 : Skládání odpadů. Základní podmínky pro navrhování a výstavbu. Český normalizační institut, Praha / 1994 /
5. DIN 18 130 : Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwert. NaBau im DIN Deutsches Institut für Normung. / 1989 /



Geotechnické vlastnosti vstupních materiálů		
	granulát	zemina
ρ_s [kgm ⁻³]	2 397	2 704
ρ_{dmax} PS [kgm ⁻³]	955	1 793
φ_{ef}	39	21
c_{ef} [kPa]	10	11

Obr. 1 Citlivost zkoumaných směsí, granulátu a zeminy na hmotnostní vlhkost a objemovou hmotnost suché směsi



Obr. 2

Jednotka WD 1000/3 na měření velmi málo propustných materiálů



Obr. 3

Instalování vzorku do tlakové komory
připojované na měřicí zařízení propustoměru